

미디어아트 확장을 위한 경험적 디지털 트윈(EDT)의 개념적 재정의 및 프레임워크 제안

진 형 우¹ · 최 규 혁^{2*}

¹동서대학교 일반대학원 영상콘텐츠학과 박사과정

²부산대학교 전임연구원

Conceptual Redefinition and Framework Proposal of Experiential Digital Twin for Media Art Expansion

Hyung-Woo Jin¹ · GyuHyeok Choi^{2*}

¹Doctoral degree, Department of Visual Contents, Graduate School of Dongseo University, Busan 47011, Korea

²Research Fellow, Pusan National University, Busan 46241, Korea

[요 약]

디지털트윈은 주로 제조업 분야에서 발전해 왔다. 디지털트윈을 지각적·경험적 시스템으로 활용할 가능성에 대해서는 상대적으로 논의가 부족하다. 본 연구는 미디어아트 응용을 위한 디지털트윈의 개념적·구조적 재정의로서 ‘경험적 디지털트윈(Experiential Digital Twin, EDT)’을 제안한다. EDT는 현실 데이터를 감각적이고 상호작용적인 표현으로 변환하는 경험적 정확성을 강조한다. 이를 위해 기존 디지털트윈 아키텍처를 기반으로 실시간 동기화와 시뮬레이션 루프와 같은 핵심 구성 요소를 재구성하여 예술적 해석과 관객 상호작용을 가능하게 한다. 또한 물리적 현실, 데이터 해석, 경험적 시뮬레이션, 관객 상호작용으로 구성된 4계층 프레임워크를 제시함으로써, 디지털트윈 기술이 산업적 최적화 도구를 넘어 실시간 미디어아트 시스템으로 확장될 수 있음을 논의한다.

[Abstract]

Although the use of digital twins has evolved within the manufacturing sector, their potential as perceptual systems remains underexplored. This study proposes the "Experiential Digital Twin" (EDT) as a conceptual and structural redefinition of digital twins for media art applications. EDT emphasizes experiential accuracy by transforming real-world data into sensory and interactive expressions. By reconfiguring core components like real-time synchronization and simulation loops, this research facilitates artistic interpretation and audience engagement. A four-layer framework comprising physical reality, data interpretation, experiential simulation, and audience interaction is introduced. This study how digital twin technology can transcend industrial optimization to function as a sophisticated real-time media art system, extending its utility toward cultural and artistic production.

색인어 : 디지털트윈, 미디어아트, Experiential Digital Twin(EDT), 재정의, 프레임워크

Keyword : Digital Twin, Media Art, Experiential Digital Twin (EDT), Redefinition, Framework

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2026.27.6.1521>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 20 March 2026; **Revised** 17 April 2026

Accepted 04 June 2026

***Corresponding Author; GyuHyeok Choi**

Tel: 

E-mail: choi8603@hanmail.net

I. 서론

디지털트윈(Digital Twin)은 물리적 환경을 디지털로 구현하여 운영 과정에서의 최적화를 위한 기술적 개념이다[1],[2]. 디지털로 구현한 결과를 통해 결과를 미리 예측하고 유지보수나 공정의 변경에 대한 시뮬레이션이 가능하다[3]. 이는 물리적 환경에서의 상황을 미리 디지털로 구현해 봄으로써 가상으로 발생할 수 있는 문제점을 미리 진단하고 공정의 사용가능성을 확인해 볼 수 있다[4]. 이러한 장점으로 인해 실제 물리적 구현을 통한 테스트는 시간과 비용이라는 자원을 절약하기 위해 비용 절감 측면에서 주로 활용된다.

디지털트윈에 대한 연구는 기능 중심의 효율을 중요하게 여기며, 정확도를 가장 중요하게 여긴다. 따라서 수치적 정확도를 메인이 될 수밖에 없는 디지털트윈은 인간의 감각과 정서에 대한 서사의 경험적 측면에 대한 고려는 부차적 요소로 취급된다[5],[6]. 이처럼 디지털트윈은 사회·문화적 측면에서 바라볼 때, 경험적인 측면이 부재한 상황이며 미디어아트를 통해 그 대안적 영역을 담당할 수 있다.

본 연구는 정확도 중심의 디지털트윈을 경험적 관점에서 바라보고 재정의할 수 있도록 계층적 구조의 프레임워크를 제안함으로써 인간의 경험적 측면을 강조하는 미디어아트 분야에서 적용가능한 구조적 전환 모델을 마련하고자 한다. 여기서 ‘경험적(Experiential)’이란 단순히 사용자의 주관적 반응을 의미하는 것이 아니라, 존 듀이(John Dewey)가 정의한 ‘예술로서의 경험(Art as Experience)’에 근거한다[7]. 듀이는 경험을 생명체와 환경 간의 능동적이고 연속적인 상호작용으로 보았으며, 예술적 경험은 이러한 상호작용이 하나의 완결된 미적 통일성을 갖출 때 발생한다고 강조하였다. 본 연구의 EDT는 물리적 환경 데이터를 매개로 관객과 시스템 간의 능동적 상호작용을 유도함으로써, 기술적 데이터를 심미적 경험의 층위로 격상시키는 것을 목표로 한다. 이는 최적화 도구로서 디지털트윈의 활용이 아닌 현실 기반 실시간 사용자 경험 측면에서 디지털트윈의 사용가능성을 확인할 수 있다.

II. 디지털트윈과 미디어아트

2-1 디지털트윈의 핵심 개념

디지털트윈(Digital Twin)은 제조업 분야에서 물리적 시스템의 상태를 가상 환경에 정밀하게 반영하고, 이를 기반으로 분석·예측·최적화를 수행하기 위한 핵심 기술로 발전해 왔다[8]. 초기 개념은 제품 생애주기 관리(Product Lifecycle Management, PLM)의 연장선에서 제안되었으며, 이후 스마트팩토리나 산업용 사이버-물리 시스템(Cyber-Physical Systems, CPS)의 핵심 구성요소로 자리 잡았다. 기존 연구들은 제조업 디지털트윈을 구성하는 핵심 요소로 Physical Asset, Virtual Model, Data Synchronization, Simulation & Optimization Loop의 네 가지 개념을 공통적으로 제시하

고 있다[9].

첫째, Physical Asset은 디지털트윈의 출발점이 되는 실제 물리적 대상이다. 이는 단일 설비, 생산 라인, 공정 단위, 혹은 공장 전체를 포함할 수 있으며, 디지털트윈 연구에서 물리 자산은 단순한 객체가 아니라 지속적으로 상태를 생성하는 시스템으로 정의된다. 기존 제조업 연구에서는 물리 자산의 정확한 상태 계측이 디지털트윈의 신뢰도를 결정하는 핵심 요소로 간주되어 왔다. 센서 기술의 발전과 함께 온도, 압력, 진동, 속도, 에너지 소비와 같은 다양한 물리적 변수가 실시간으로 수집되며, 이러한 데이터는 가상 모델의 정합성을 유지하기 위한 기반으로 활용된다[10],[11]. 특히 고정밀 계측과 표준화된 데이터 수집은 품질 관리, 공정 안정성 확보, 예지 보전(predictive maintenance)을 가능하게 하는 핵심 전제 조건으로 다루어져 왔다[12],[13].

둘째, Virtual Model은 물리 자산을 디지털 공간에서 재현하는 가상 표현체로서, 디지털트윈 개념의 중심축을 이룬다. 제조업 분야의 선행 연구들은 가상 모델을 단순한 3차원 시각화 모델이 아닌, 물리 법칙과 공정 논리가 내재된 계산 가능한 모델로 정의한다[14]. 이러한 가상 모델은 CAD, CAE, 물리 기반 시뮬레이션, 혹은 데이터 기반 모델링 기법을 통해 구축되며, 물리 자산의 구조적 특성뿐만 아니라 동적 거동까지 반영하는 것을 목표로 한다[15]. 특히 제조 디지털트윈에서는 가상 모델의 정확도가 시뮬레이션 결과의 신뢰성과 직결되기 때문에, 모델 검증과 지속적 업데이트가 중요한 연구 주제로 다루어져 왔다[16].

셋째, Data Synchronization은 물리 자산과 가상 모델을 연결하는 핵심 메커니즘으로, 디지털트윈을 단순한 디지털 모델과 구분 짓는 결정적 요소이다. 기존 연구에 따르면, 데이터 동기화는 실시간 또는 준실시간으로 물리 시스템의 상태 변화를 가상 모델에 반영하는 과정을 의미한다[17]. 이 과정은 센서 데이터 수집, 데이터 전송, 전처리, 모델 업데이트의 연속적인 흐름으로 구성되며, 지연(latency)과 데이터 손실을 최소화하는 것이 주요 기술적 과제로 제시되어 왔다[18]. 제조업 디지털트윈 연구에서는 데이터 동기화를 통해 가상 모델이 항상 ‘현재 상태’를 반영하도록 유지함으로써, 공정 모니터링과 즉각적인 의사결정을 가능하게 하는 것을 핵심 목표로 설정한다[19].

넷째, Simulation & Optimization Loop는 제조업 디지털트윈의 활용 가치를 실현하는 핵심 기능 영역이다. 선행 연구들은 디지털트윈을 통해 구축된 가상 모델이 다양한 시나리오 기반 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 공정 조건을 최적화하는 폐쇄형 루프(closed-loop)를 형성한다고 설명한다[20]. 이 루프에서는 시뮬레이션 결과가 다시 물리 자산의 제어 변수로 반영되며, 이를 통해 생산성 향상, 비용 절감, 품질 안정화와 같은 산업적 성과가 도출된다[21]. 특히 이 과정에서 디지털트윈은 단순한 분석 도구를 넘어, 실제 제조 시스템의 의사결정을 지원하거나 자동화하는 역할을 수행한다[22].

2-2 미디어아트

미디어아트(Media Art)는 디지털 기술의 발전과 함께 기존 예술 형식의 표현 방식과 수용 구조를 근본적으로 재구성해 온 예술 영역으로 평가된다[23]. 최근의 미디어아트는 AI와 디지털 트윈 기술의 결합을 통해 현실과 가상의 경계를 허물고, 관객에게 더욱 고도화된 현존감과 상호작용성을 제공하는 방향으로 진화하고 있다[24],[25]. 특히 컴퓨팅 기술, 센서, 네트워크 환경의 확산은 예술 작품을 고정된 결과물이 아닌, 사용자와 환경에 따라 변화하는 동적 시스템으로 전환시켰다는 점에서 주목받는다. 이러한 변화 속에서 미디어아트 이론은 주로 인터랙티브 아트, 실시간 반응형 미디어, 그리고 몰입과 현존감(Immersion and Presence)이라는 세 가지 핵심 개념을 중심으로 발전해 왔다[26].

먼저 인터랙티브 아트(Interactive Art)는 사용자의 참여가 작품의 일부가 되는 예술 형식을 의미하며, 기존의 수동적 감상자 모델을 근본적으로 전복하는 개념으로 논의되어 왔다. 선행 연구들은 인터랙티브 아트를 ‘사용자의 행위가 작품의 상태 변화를 유발하는 시스템’으로 정의하며, 이때 작품은 미리 완성된 결과물이 아니라 사용자와의 상호작용을 통해 지속적으로 생성되는 과정(process)로 이해된다[27]. 이러한 관점에서 인터랙션은 단순한 입력-출력 관계를 넘어, 예술적 의미가 형성되는 핵심 메커니즘으로 간주된다. 특히 인터랙티브 아트 이론에서는 작가의 통제와 사용자의 자유 사이의 긴장이 중요한 논의 대상으로 다루어지며, 사용자의 개입이 작품의 자율성을 훼손하는 것이 아니라 오히려 작품의 존재 조건을 구성한다는 해석이 제시되어 왔다[28].

실시간 반응형 미디어(Real-Time Responsive Media)는 미디어아트의 기술적·구조적 특성을 설명하는 핵심 개념이다. 기존 연구에 따르면, 실시간성은 단순히 반응 속도의 문제가 아니라, 시스템이 현재 발생하는 사건을 즉각적으로 반영함으로써 사용자에게 지속적인 ‘현재성(now-ness)’을 경험하게 만드는 조건으로 이해된다[29]. 실시간 반응형 미디어 환경에서는 센서 데이터, 사용자 행동, 환경 변화 등이 지연 없이 작품의 시각·청각적 출력에 반영되며, 이로 인해 작품은 고정된 상태를 유지하지 않고 끊임없이 변화하는 살아있는 시스템처럼 인식된다. 선행 연구들은 실시간 반응 구조가 사용자로 하여금 작품을 ‘관찰 대상’이 아닌 ‘공존하는 시스템’으로 인식하게 만든다고 지적한다[30]. 또한 실시간 반응성은 미디어아트를 전통적 영상 매체나 사전 제작된 디지털 콘텐츠와 구분 짓는 핵심 기준으로 기능해 왔다.

몰입(Immersion)과 현존감(Presence)은 미디어아트 경험의 질적 특성을 설명하는 주요 이론적 개념이다. 몰입은 사용자가 작품 경험에 깊이 관여하여 외부 자극에 대한 인식이 감소하는 상태를 의미하며, 현존감은 사용자가 매개된 환경 속에 ‘실제로 존재하고 있다’고 느끼는 주관적 감각으로 정의된다[31]. 기존 연구들은 미디어아트에서 몰입과 현존감이 기술적 사실성보다 경험적 일관성에 의해 강화된다고 설명한

다. 즉, 시각적 사실성이나 고해상도 표현보다도, 사용자의 행위와 시스템 반응 사이의 인과적 연결성이 유지될 때 더 강한 현존감이 형성된다는 것이다[32]. 이러한 관점에서 미디어아트는 가상현실이나 시뮬레이션 기술과 마찬가지로 사용자의 지각 구조를 재조직하는 경험 환경으로 이해되어 왔다. 이러한 미디어아트의 경험적 특성은 메를로-퐁티(Merleau-Ponty)의 지각 현상학적 관점에서 더욱 구체화된다. 메를로-퐁티에 따르면 인간의 지각은 신체화된(embodied) 경험을 통해 완성되며, 주체와 세계는 신체를 통해 상호 침투한다. EDT는 물리적 세계의 데이터를 추상적 수치로만 다루지 않고, 이를 관객의 신체적 감각을 자극하는 시각·청각적 요소로 재구성한다[33]. 이는 관객으로 하여금 가상과 물리 공간이 중첩된 환경에서 단순한 관찰자를 넘어 신체적 현존감(Presence)을 지닌 능동적 주체로서 작품과 공존하게 만든다. 결과적으로 EDT에서의 ‘경험’은 기술적 정확성이 아닌, 데이터와 신체 지각 사이의 ‘경험적 정합성’에 의해 정의된다.

2-3 디지털트윈과 미디어아트의 비교

디지털트윈과 미디어아트는 서로 상이한 연구 맥락과 목적을 기반으로 발전해 왔음에도 불구하고, 기술적·구조적 차원에서는 주목할 만한 공통 특성을 공유한다. 특히 실시간성, 센서 및 데이터 기반 반응 구조, 그리고 사용자 개입에 따른 시스템 상태 변화라는 측면에서 두 영역은 유사한 시스템적 기반을 갖는다. 그러나 이러한 공통된 기술적 토대 위에서 설정되는 궁극적 목표와 가치 지향점은 본질적으로 상이하며, 이 차이는 디지털트윈과 미디어아트를 구분 짓는 핵심 요인으로 작용하며 정리하면 표 1과 같다.

실시간성(real-time operation)은 디지털트윈과 미디어아트 모두에서 핵심적인 시스템 조건으로 작용한다. 제조업 디지털트윈 연구에서 실시간성은 물리 자산의 현재 상태를 지연 없이 가상 모델에 반영함으로써, 공정 모니터링과 즉각적인 의사결정을 가능하게 하는 기술적 전제 조건으로 정의되어 왔다[34]. 이는 데이터 지연이나 불일치가 곧 시스템 신뢰도의 저하로 이어질 수 있기 때문이다[35]. 미디어아트 이론에서 실시간성은 기술적 정확성보다는 경험적 현재성(now-ness)을 생성하는 조건으로 논의된다. 사용자의 행위나 환경 변화가 즉각적으로 작품에 반영될 때, 사용자는 작품을 고정된 대상이 아닌 현재 진행 중인 사건으로 인식하게 되며, 이러한 인식은 몰입과 현존감 형성의 핵심 요인으로 작용한다. 즉, 동일한 실시간성이라는 개념이 제조 분야에서는 기능적 요구로, 미디어아트에서는 경험적 효과로 재해석된다. 서로 다른 방향으로 실시간성을 활용하고 있지만 디지털트윈과 미디어아트는 실시간 정보를 필요로 한다는 것에는 이견이 없다.

다음으로, 센서 및 데이터 기반 반응 구조는 두 영역을 관통하는 또 다른 공통점이다. 제조업 디지털트윈에서는 센서를 통해 수집된 물리 데이터가 가상 모델의 상태를 갱신하고, 시

표 1. 디지털트윈과 미디어아트 유사점과 차이점

Table 1. Similarities and differences between digital twin and media art

Category	Digital Twin	Media Art
Commonalities	Synchronization of physical asset states with minimal latency to support decision-making	A condition for enabling a sense of “now-ness” and eventfulness in audience experience
	-Emphasis on objective, quantitative data with noise minimization -Data normalization for prediction and optimization	-Emphasis on interpretive and transformative use of data for sensory and semantic expression -Data normalization for visual, auditory, and spatial representation
	Limited intervention focused on control and decision-making	Non-deterministic intervention where user actions become part of the artwork
Differences	Prediction of future states and derivation of optimal operating conditions	Generative mechanism for producing experiential and sensory responses
	Closed-loop system oriented toward control and optimization	Open-loop system allowing experiential accumulation and variation
	Accurate state prediction and maximization of operational efficiency	Generation of meaningful experiences and expansion of interpretability
	Accuracy, error rate, predictive reliability	Immersion, presence, and experiential consistency

물레이션과 최적화 과정의 입력값으로 활용된다. 이때 데이터는 객관적 사실을 반영하는 지표로 간주되며, 노이즈는 제거되어야 할 오류 요소로 처리된다[36]. 반면 미디어아트에서 데이터는 반드시 사실을 정확히 재현해야 할 필요는 없으며, 오히려 해석과 변형의 대상이 된다. 센서 데이터는 시각적, 청각적, 공간적 표현으로 번역되며, 이러한 변환 과정 자체가 예술적 의미 형성의 일부로 작동한다[37]. 그럼에도 불구하고 양 영역 모두 데이터에 기반한 반응 시스템을 전제로 한다는 점에서, 디지털트윈과 미디어아트는 기술적으로 동일한 계보 위에 놓여 있다고 평가할 수 있다.

또한 사용자 개입에 따른 시스템 상태 변화 역시 두 영역의 중요한 공통 특성이다. 제조업 디지털트윈에서는 사용자의 개입이 주로 시스템 제어와 의사결정의 형태로 나타나며, 이는 공정 조건 조정이나 운영 전략 수립으로 이어진다. 이러한 개입은 시스템의 안정성과 예측 가능성을 유지하는 범위 내에서 제한적으로 허용된다. 반면 미디어아트에서는 사용자의 개입이 작품의 존재 조건 자체를 구성하며, 사용자의 행위는 작품 상태 변화의 직접적인 원인으로 작동한다. 이때 개입의 결과는 사전에 완전히 예측될 수 없으며, 비결정성은 오히려 미디어아트 경험의 본질적 특성으로 수용된다.

이러한 공통점에도 불구하고, 디지털트윈과 미디어아트는 지향하는 목적과 가치 체계에서 근본적인 차이를 보인다. 제조업 디지털트윈의 핵심 목적은 물리 시스템의 상태를 가능한 한 정확하게 예측하고, 이를 통해 효율성과 안정성을 극대화하는 데 있다. 가상 모델의 충실도와 시뮬레이션의 정확성은 디지털트윈의 성과를 평가하는 주요 기준으로 작용하며, 이상적인 디지털트윈은 물리 시스템의 미래 상태를 오차 없이 재현하는 것을 목표로 한다[38]. 이러한 맥락에서 디지털트윈은 본질적으로 목적 지향적이며, 기능적 최적화를 중심으로 설계된 시스템이라 할 수 있다. 반면 미디어아트는 정확한 상태 예측을 목표로 하지 않으며, 오히려 의미 있는 경험의 생성과 해석 가능성의 확장을 지향한다. 미디어아트 시스템에서 중요한 것은 동일한 입력에 대해 동일한 결과가 반복되는지가 아니라, 사용자에게 일관된 경험적 맥락을 제공하는지 여부이다. 즉, 미디어아트에서의 성공 기준은 정확성이 아니라 경험의 밀도, 감각적 설득력, 그리고 사용자의 해석 참여를 유도하는 능력에 의해 판단된다[39]. 이러한 차이는 디지털트윈과 미디어아트가 동일한 기술적 요소를 활용하면서도 전혀 다른 문화적·사회적 역할을 수행하게 만드는 결정적 요인으로 작용한다[40].

2-4 경험적 디지털트윈과 미디어아트 패러다임의 구분

본 소절에서는 EDT가 이러한 기존 개념을 단순히 재명명한 것이 아니라, 디지털트윈 개념을 이론적 중심축으로 재배치한 접근임을 구조적으로 논증한다. EDT를 디지털트윈으로 규정하기 위해서는 3개의 최소 조건이 필요하다.

- 지속적 동기화(Continuous Synchronization): 일회성 이벤트 트리거가 아닌, 물리적 환경의 변화가 실시간 데이터 스트림으로 가상 모델에 끊임없이 반영되어야 한다.
- 상태 보존성(State Persistence): 과거의 상호작용 데이터가 휘발되지 않고 가상 모델의 '상태(State)'로 축적되어, 현재의 반응이 과거의 상태에 영향을 받는 '시뮬레이션 루프'를 가져야 한다.
- 경험적 정합성(Experiential Fidelity): 산업용 DT가 '기술적 정확도'를 추구한다면, EDT는 가상과 물리 세계 사이의 감각적 연결을 통해 관객이 하나의 통합된 공간에 있다고 느끼는 '경험의 일치'를 제공해야 한다.

이를 만족하기 때문에 EDT를 디지털트윈에 포함된다고 할 수 있다. 그러나 디지털트윈과 미디어아트를 연결하는 선행 연구가 제한적이라는 주장에 대해, 기존 Cyber-Physical Art, Smart City Media Facade, Data-driven Generative Art, Urban Computing 기반 미디어아트와의 관계를 명확히 구분할 필요가 있다. 이들 연구 흐름은 모두 현실 데이터와 디지털 표현을 결합한다는 점에서 EDT와 외형적 유사성을 갖지만, 시스템 구조와 연구 목적 차원에서는 중요한 차이를

표 2. EDT와 미디어아트 패러다임 비교

Table 2. Comparison between EDT and related media art paradigms

Category	CPS / Interactive Art	Smart City Media / Urban Computing	Data-driven Generative Art	Experiential Digital Twin (EDT)
Physical-Virtual Relationship	Input-output-oriented	Data source-representation relationship	Data-driven stimulation	State-based responsive relationship
Concept of State	No explicit state model	Limited state representation	No state concept	Explicit state model
Temporality	Event-driven	Real-time visualization	Instantaneous response	Continuous state updating
Simulation	None or simple reactive behavior	Limited	Generative rules	State-transition-based simulation
Primary Objective	Interaction	Information delivery	Aesthetic generation	Experience generation (experiential coherence)
Compliance with Digital Twin Criteria	No	Partial	No	Yes

지낸다.

Cyber-Physical Art 및 CPS 기반 인터랙티브 아트는 물리적 입력과 디지털 출력 간의 실시간 상호작용에 초점을 두며, 센서와 액추에이터를 활용한 반응형 시스템을 주요 특징으로 한다. 그러나 이러한 시스템은 대체로 이벤트 기반(event-driven) 구조를 가지며, 물리 현실과 가상 시스템 간의 지속적인 상태 동기화나 상태 기반 시뮬레이션을 전제로 하지 않는다. 반면 EDT는 물리 상태가 시간에 따라 누적·갱신되며, 해석된 상태가 시뮬레이션의 진행을 규정하는 구조를 갖는다. 이 점에서 EDT는 단순한 상호작용 시스템이 아니라, 디지털트윈의 핵심 요건인 상태 중심 모델링을 유지한다.

Smart City Media Facade와 Urban Computing 기반 미디어아트는 도시 데이터를 활용한 공공 미디어 표현에 강점을 가지며, 대규모 센서 네트워크와 실시간 데이터 스트림을 적극적으로 활용한다. 그러나 이러한 연구는 주로 데이터의 시각화 또는 정보 전달에 초점을 두며, 가상 모델이 물리 현실의 대리적 상태를 유지·갱신하는 디지털트윈 구조를 명시적으로 전제하지 않는다. EDT에서는 도시나 공간이 단순한 데이터 소스가 아니라, 디지털 시스템 내부의 상태를 규정하는 물리적 대응체로 작동하며, 이는 ‘도시 데이터 활용’과 ‘도시의 디지털 쌍둥이’라는 개념적 차이를 형성한다.

Data-driven Generative Art 역시 EDT와 혼동될 수 있는 영역이다. 이들 연구는 데이터에 의해 생성 규칙이 변화하는 생성적 시스템을 특징으로 하지만, 데이터는 주로 생성 알고리즘을 자극하는 외생 변수로 작동한다. 반면 EDT에서는 데이터가 시스템의 상태를 구성하는 내생 변수로 작동하며, 시뮬레이션은 상태 전이를 계산하는 구조를 유지한다. 즉, EDT에서 데이터는 ‘영감을 주는 입력’이 아니라 ‘시스템 정체성을 규정하는 요소’로 기능한다.

이러한 비교를 통해 볼 때, EDT에서 ‘디지털트윈’이라는 용어를 사용하는 것은 단순한 개념 차용이 아니라 이론적 필연성을 가진다. 디지털트윈 개념은 물리-가상 간 지속적 동기화, 상태 기반 시뮬레이션, 시간적 누적성을 핵심 전제로 하며, 이는 EDT가 단순한 실시간 미디어 시스템과 구별되는 결

정적 기준을 제공한다. 따라서 EDT는 기존 미디어아트 연구 흐름을 포괄적으로 재명명한 개념이 아니라, 디지털트윈의 구조적 정의를 경험 생성이라는 새로운 목적 아래 재배치한 확장 개념으로 이해되어야 한다.

2-5 EDT의 차별적 기제: 상태 기반 시뮬레이션과 사례 분석

EDT가 기존의 센서 기반 인터랙티브 아트(Interactive Art)나 데이터 시각화와 차별화되는 결정적 지점은 ‘상태 기반 시뮬레이션(State-based Simulation)’의 도입이다. 일반적인 인터랙티브 시스템이 사용자의 입력에 즉각적으로 반응하는 ‘이벤트 중심(Event-driven)’ 구조를 갖는다면, EDT는 입력된 데이터를 가상 모델의 ‘상태(State)’를 갱신하는 변수로 활용한다. 이는 시스템이 과거의 상호작용 기록을 누적하고, 현재의 상태를 기반으로 다음 반응을 계산하는 ‘시뮬레이션 루프’를 가짐을 의미한다. 이러한 구조적 필연성은 관객에게 단순한 ‘반응’을 넘어 시스템과 ‘공진화(Co-evolution)’하는 듯한 깊은 몰입감을 제공한다.

이러한 EDT의 4계층 구조는 라파엘 로자노-헤머(Rafael Lozano-Hemmer)의 작품 <Pulse Room>에서 명확히 확인된다. 이 작품에서 관객의 심박수 데이터는 ‘물리 계층’에서 수집되어 ‘데이터 해석 계층’을 통해 전구의 점멸 리듬으로 변환된다. 여기서 핵심은 ‘경험적 시뮬레이션 계층’이다. 작품은 단 한 명의 심박수만을 보여주는 것이 아니라, 수백 개 전구의 점멸 상태(State)를 유지하며 새로운 관객의 데이터가 유입될 때마다 전체 전구의 배열 상태를 한 칸씩 이동시킨다. 이는 시스템이 ‘누적된 심박수들의 상태’라는 가상 모델을 실시간으로 시뮬레이션하고 있음을 보여주며, 관객은 ‘청중 상호작용 계층’을 통해 자신의 생체 신호가 거대한 시스템의 역사적 상태의 일부가 되는 경험을 하게 된다.

또한, teamLab의 <Forest of Resonating Lamps> 사례에서도 EDT의 구조를 발견할 수 있다. 관객의 위치 데이터는 램프의 색상 변화라는 즉각적 반응에 그치지 않고, 인접한 램프로 전이되는 ‘전과 상태’를 시뮬레이션한다. 시스템은 램프

들 사이의 거리와 연결 상태를 가상 모델로 보유하고 있으며, 관객의 개입에 따라 이 상태를 실시간으로 갱신하며 빛의 확산을 계산한다. 이러한 상태 기반의 시뮬레이션은 관객에게 작품이 단순한 기계적 반응체가 아니라, 자신과 유기적으로 연결되어 살아있는 시스템이라는 '경험적 정합성'을 부여한다. 결과적으로 EDT 프레임워크는 이러한 복잡한 상태 전이를 구조적으로 설계하고 관리할 수 있는 이론적 틀을 제공한다는 점에서 기존 연구와 차별화된다.

III. 디지털트윈의 목적 전환 모델

디지털트윈은 제조업을 중심으로 발전해 온 기술 개념으로서, 그 근본적인 목적은 물리 시스템의 상태를 정확하게 재현하고 이를 기반으로 운영 효율을 극대화하는 데에 있다. 기존 제조업 디지털트윈 연구에서 디지털트윈은 주로 공정 최적화, 예지 보전, 품질 안정화와 같은 명확한 산업적 목표를 달성하기 위한 수단으로 정의되어 왔으며, 이러한 맥락에서 디지털트윈의 성과는 정확성(accuracy)과 신뢰도에 의해 평가되어 왔다. 즉, 물리 자산과 가상 모델 간의 오차를 최소화하고, 시뮬레이션 결과가 실제 시스템의 미래 상태를 얼마나 정확하게 예측하는지가 디지털트윈의 핵심 가치로 간주되어 왔다 [41]. 이러한 목적 지향성은 디지털트윈을 본질적으로 최적화 중심 시스템(optimization-oriented system)으로 규정한다. 제조업 분야에서 디지털트윈은 물리 시스템의 상태를 실시간으로 반영하는 가상 모델을 통해 다양한 시나리오를 시뮬레이션하고, 그 결과를 다시 물리 시스템의 제어 변수로 환원하는 폐쇄형 루프 구조를 형성한다. 이 과정에서 디지털트윈의 역할은 복잡한 현실을 계산가능한 문제로 환원하고, 오류를 줄이며, 가장 효율적인 해답을 도출하는 데 있다. 다시 말해, 기존 디지털트윈은 ‘무엇이 가장 올바른 상태인가’를 판단하기 위한 기술적 판단 장치로 기능해 왔다. 그러나 디지털트윈의 이러한 목적 정의는, 동시에 그 활용 가능성을 산업적 문제 해결의 범주로 제한해 왔다. 정확성 중심의 접근은 물리적 사실을 충실히 재현하는 데에는 효과적이지만, 인간의 감각, 해석, 경험이 개입되는 영역에서는 필연적으로 한계를 드러낸다. 미디어아트와 같은 경험 중심 영역에서는 시스템의 목표가 단일한 최적 상태에 수렴하는 것이 아니라, 사용자와의 상호작용 속에서 다양한 의미와 감각적 반응을 생성하는데 있기 때문이다. 이러한 맥락에서 본 연구는 디지털트윈을 구성하는 기술적 요소는 유지하되, 그 목적을 근본적으로 전환하는 개념적 모델을 제안한다.

연구에서 제안하는 목적 전환 모델은 디지털트윈의 목표를 최적화와 오류 감소에서 해석, 감각화, 서사 생성으로 이동시키는 데에 초점을 둔다. 이 전환은 디지털트윈의 구조를 해체하거나 새로운 기술로 대체하는 것이 아니라, 동일한 디지털트윈 아키텍처를 서로 다른 목적 체계 아래 재배치하는 개념적 재정의로 이해될 수 있다. 즉, 물리 현실과 가상 모델, 데

이터 동기화, 시뮬레이션이라는 핵심 구성 요소는 유지되지만, 그 기능적 방향성과 평가 기준은 전혀 다른 지점으로 이동한다. 구체적으로, 목적 전환된 디지털트윈에서 해석(interpretation)은 데이터의 정확한 재현보다 데이터가 어떤 의미를 생성하는가에 초점을 둔다. 센서로부터 수집된 물리 데이터는 더 이상 단일한 사실을 보고하는 지표가 아니라, 감각·정서적 반응을 유도하는 해석의 재료로 작동한다. 이어서 감각화(sensory translation)는 수치화된 데이터를 시각, 청각, 공간적 요소로 변환함으로써 사용자가 데이터를 인지 가능한 형태로 경험하도록 하는 역할을 수행한다. 이 과정에서 데이터는 객관적 정확성을 유지해야 할 의무에서 벗어나, 경험의 일관성과 설득력을 기준으로 재구성된다. 마지막으로 서사 생성(narrative construction)은 목적 전환된 디지털트윈의 핵심 기능으로 작동한다. 기존 제조업 디지털트윈에서 시뮬레이션은 미래 상태를 예측하기 위한 도구였던 반면, 본 연구에서 제안하는 디지털트윈에서는 시뮬레이션이 시간에 따라 변화하는 경험의 궤적을 형성한다. 사용자의 개입과 환경 변화는 시스템 상태에 누적되며, 이를 통해 단일한 정답이 아닌 복수의 경험적 서사가 생성된다. 이러한 서사성은 디지털트윈을 더 이상 제어와 판단의 도구가 아니라, 경험과 해석의 장으로 전환시킨다.

요약하면, 디지털트윈의 목적 전환 모델은 체험형 디지털트윈(Experiential Digital Twin, EDT)이다. 디지털트윈을 활용하는 기술적 기반은 유지하되, 그 지향점을 정확성 중심의 기능적 시스템에서 의미 중심의 경험적 시스템으로 이동시키는 개념적 전환이다. 이는 디지털트윈을 산업적 효율성을 위한 도구로 한정하지 않고, 인간의 감각과 해석이 개입되는 문화적·예술적 영역으로 확장할 수 있는 이론적 가능성을 제시하며, 디지털트윈 연구의 새로운 방향성을 제안한다. 이를 4계층 구조로 표현하면 그림 1과 같이 표현된다.

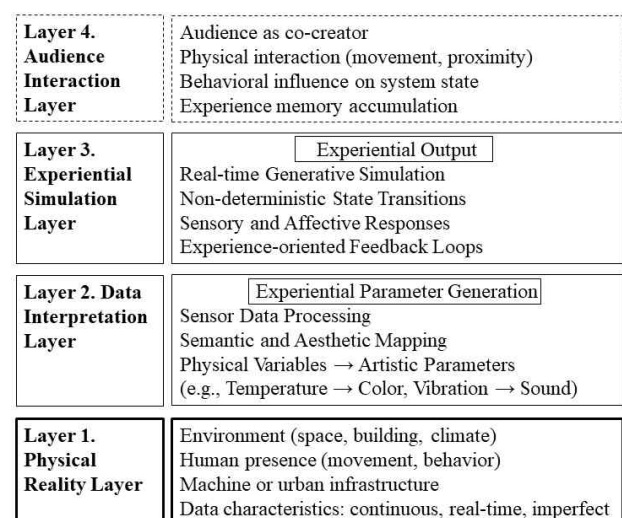


그림 1. 체험형 디지털 트윈(EDT)을 위한 4계층 구조
 Fig. 1. 4 layer architecture for experiential digital twin (EDT)

Experiential Digital Twin(EDT)은 기존 디지털트윈의 제어 루프를 '경험 생성 루프(Experiential Loop)'로 재배치함으로써, 데이터의 불안정성을 예술적 표현의 자원으로 수용하는 구조적 전환을 이룬다. 그림 1에 제시된 바와 같이, EDT는 물리적 현실과 가상 모델 간의 실시간 연결, 데이터 기반 상태 갱신, 시뮬레이션을 통한 상태 생성이라는 디지털트윈의 기본 전제를 그대로 계승한다. 그러나 전통적인 디지털트윈이 물리 시스템의 상태를 정밀하게 재현하고 미래 상태를 예측함으로써 제어와 의사결정을 지원하는 데 초점을 맞추었다면, EDT는 동일한 구조를 활용하되 데이터의 해석 방식과 시뮬레이션의 산출물을 근본적으로 재정의한다는 점에서 명확한 목적 전환을 내포한다.

구조적으로 EDT는 Physical Reality Layer, Data Interpretation Layer, Experiential Simulation Layer, Audience Interaction Layer의 4계층으로 구성된다. Physical Reality Layer는 공간, 환경, 인간의 움직임 등 현실 세계에서 발생하는 연속적 데이터를 수집하며, 이는 제조업 디지털트윈의 물리 자산 계층과 기능적으로 유사하다. 그러나 Data Interpretation Layer에서부터 결정적인 차이가 발생한다. 이 계층에서 센서 데이터는 더 이상 최적화 변수나 제어 파라미터로만 처리되지 않으며, 색채, 음향, 움직임과 같은 예술적·감각적 변수로 의미 변환된다. 이러한 해석적 변환을 통해 Experiential Simulation Layer는 기계적 결과나 예측 값을 산출하는 대신, 실시간으로 변화하는 감각적 반응과 정서적 경험을 생성하는 생성적 시뮬레이션 환경으로 작동하게 된다. 즉, 시뮬레이션의 목적은 미래 상태의 정확한 예측이 아니라, 경험의 흐름과 변화를 구성하는 데 있다.

EDT를 규정하는 또 하나의 핵심 요소는 Audience Interaction Layer에서 구현되는 인간의 역할 변화이다. 이 구조에서 사용자는 시스템을 조작하는 사용자(user)가 아니라, 디지털트윈의 상태 변화에 직접적으로 개입하는 공동 창작자(co-creator)로 위치한다. 사용자의 신체적 존재, 움직임, 반응은 데이터 흐름의 일부로 다시 시스템에 반영되며, 이는 닫힌 제어 루프를 전제로 하는 기존 디지털트윈과 달리 비결정성을 내재한 개방형 피드백 구조를 형성한다. 결과적으로 EDT는 정확성이나 예측 가능성보다 경험적 일관성과 몰입의 지속성을 평가 기준으로 삼는 디지털트윈으로 전환된다. 이러한 목적 전환 모델은 디지털트윈을 산업적 효율성을 위한 도구에 국한하지 않고, 감각적 경험과 서사를 생성하는 매개체로 확장함으로써, 공학 기반 디지털트윈 연구와 미디어아트 실천을 연결하는 이론적 교차점을 제시한다.

3-1 EDT 개념 기반 방법론적 규정

본 연구는 정량적 실험과 검증을 중심으로 하는 전통적 공학 연구 방법론에도, 개별 작품의 미학적 의미 해석을 중심으로 하는 순수 예술 연구 방법론에도 속하지 않는다. 대신, 디지털트윈의 구조적 원리를 설계 관점에서 재구성하고 이를 미

디어아트 경험 생성 시스템으로 전환하는 과정을 중심으로 하는 Design-oriented research이자 System architecture-based methodology를 채택한다. 이러한 접근은 기술적 정확성이나 통계적 유의성을 주된 평가 기준으로 삼기보다, 특정 개념이 어떠한 구조적 설계를 통해 구현 가능해지는지를 명확히 제시하는 데 연구의 초점을 둔다.

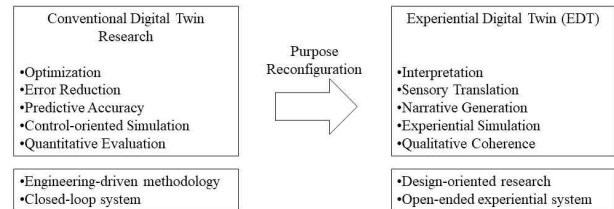


그림 2. 디지털 트윈 연구의 EDT로의 개념적 전환 논리
Fig. 2. Conceptual transition logic of digital twin research toward EDT

구체적으로, Design-oriented research는 새로운 기술을 발명하거나 단일 작품을 창작하는 것을 목표로 하지 않는다. 대신, 제조업 디지털트윈에서 확립된 물리-가상 연계 구조, 데이터 동기화 방식, 시뮬레이션 루프를 해체하고, 이를 미디어아트 맥락에서 재배치함으로써 경험 생성이 가능한 설계 절차를 도출하는 것을 목적으로 한다. 이 과정에서 '설계'는 시각적 형태나 인터페이스 디자인에 국한되지 않으며, 데이터 해석 방식, 시뮬레이션의 출력 성격, 사용자 개입 구조까지를 포함하는 시스템 차원의 설계로 확장된다. 따라서 연구의 주요 산출물은 단일 전시 사례가 아니라, 반복 적용이 가능한 구조적 모델과 작동 논리를 설명하는 설계 프레임워크이다.

아울러 System architecture-based methodology는 EDT를 구성하는 각 계층과 그 상호작용을 분석 단위로 삼는다. Physical Reality Layer에서 수집되는 현실 데이터가 Data Interpretation Layer를 통해 예술적 변수로 변환되고, Experiential Simulation Layer에서 감각적 반응으로 재구성되며, Audience Interaction Layer를 통해 다시 시스템 상태에 영향을 미치는 순환 구조는 핵심 분석 틀을 형성한다. 이 방법론에서 중요한 것은 각 계층이 개별적으로 얼마나 정교한가가 아니라, 계층 간 관계가 일관된 목적 전환 논리에

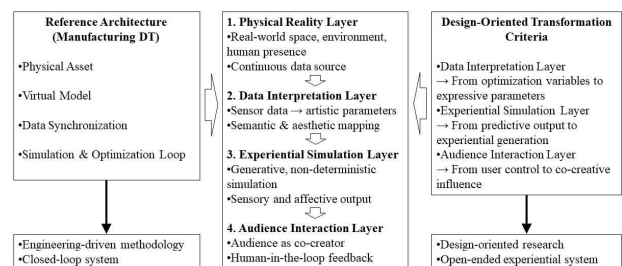


그림 3. 경험적 디지털 트윈을 위한 시스템 아키텍처 기반 방법론
Fig. 3. System architecture-based methodology for experiential digital twin

따라 설계되었는가 하는 점이다. 다시 말해, 제조 디지털트윈의 구조를 단순히 미디어아트에 적용하는 것이 아니라, 최적화와 제어를 지향하던 구조가 어떻게 해석, 감각화, 서사 생성이라는 새로운 목적을 수행하도록 재구성될 수 있는지를 단계적으로 제시하는 데 연구의 방법론적 의의가 있다.

결과적으로 EDT는 디지털트윈을 활용한 미디어아트 연구를 개별 작품 분석이나 기술적 시연에 머무르게 하지 않고, 재현 가능한 설계 절차와 구조적 전환 모델을 제시함으로써 학술적 논의의 대상으로 확장한다. 이러한 방법론적 입장은 공학과 예술 사이의 중간 영역을 모호하게 혼합하는 것이 아니라, 시스템 설계와 아키텍처 분석이라는 공통 언어를 통해 두 영역을 연결하는 이론적·실천적 기반을 제공한다는 점에서 차별적 의미를 지닌다.

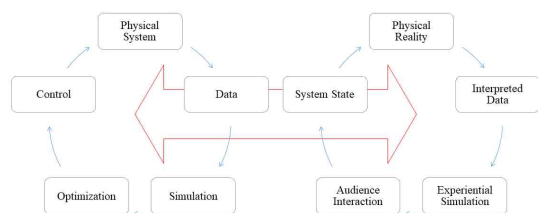


그림 4. 운영 루프에서 경험 루프로의 방법적 개요

Fig. 4. Method overview: From operational loop to experiential loop

3-2 Methodological Overview

연구의 방법론은 그림 2와 그림 3에 제시된 개념적 전환 논리와 구조적 구현 기준을 토대로 구성된다. 그림 2는 기존 제조업 중심 디지털트윈 연구가 최적화와 오류 감소를 목표로 하는 공학적 방법론에 기반해 왔음을 전제한 뒤, 동일한 구조적 자원을 경험과 의미 생성을 목적으로 재배치하는 전환 논리를 제시한다. 그림 3은 이러한 목적 전환이 임의적 해석이나 개별 작품 창작에 의존하지 않고, 재현 가능한 시스템 아키텍처 설계 절차로 구현될 수 있음을 구조적으로 설명한다. 이 두 그림을 방법론적 기준점으로 삼아, Experiential Digital Twin(EDT)을 구현하기 위한 설계 중심 연구(design-oriented research) 접근을 채택한다.

이러한 접근에서 핵심적인 방법론적 결정은 제조 디지털트윈에서 전제되는 ‘완벽한 측정(perfect measurement)’과 ‘노이즈 제거(noise elimination)’를 목표로 하지 않는다는 점이다. 대신 본 연구는 데이터의 불완전성, 결측, 변동성을 오류로 간주하지 않고, 경험을 유도하는 표현적 조건으로 적극 수용한다. 이는 정확한 상태 예측과 제어를 목적으로 하는 공학적 디지털트윈과의 근본적인 차별점이며, EDT가 경험 생성 시스템으로 작동하기 위해 요구되는 방법론적 전환이다. 다시 말해, 본 연구의 방법론은 데이터의 정확성을 최대화하는 것이 아니라, 데이터가 지닌 불완전성이 사용자의 감각적 해석과 몰입을 어떻게 유발하는지를 설계 차원에서 규정하는 데 초점을 둔다.

표 3. 단계별 방법론적 구조

Table 3. Layer-by-layer methodological structure

Category	Description
Physical Reality Layer: Embracing Incomplete Real-World Data	-Assumes that data generated from space, environment, and human movement are inherently incomplete and unstructured -Treats missing data and intermittent signal loss not as system errors but as elements that reflect the discontinuity and contingency of the physical world -Redefines reality not as an object to be precisely replicated, but as the starting point for experience generation
Data Interpretation Layer: Semantic Transformation Rather Than Noise Removal	-Considers noise and variability as expressive resources rather than artifacts to be eliminated -Transforms unstable sensor oscillations, latency, and deviations into fluctuations of color, sonic distortion, and variations in visual rhythm -Reinterprets data not as numerical descriptions that accurately explain physical states, but as signals that trigger sensory responses
Experiential Simulation Layer: Generating Sensory Responses Rather Than Predictions	-Treats non-determinism not as instability to be eliminated, but as a core element that ensures experiential diversity and non-repeatability -Designs simulations to allow and amplify variation -Evaluates simulation success based on sensory coherence and sustained immersion, rather than accuracy or reproducibility
Audience Interaction Layer: Co-creative Structure Mediated by Imperfection	-Integrates human actions as dynamic variables within the system to complete non-deterministic narratives -User engagement is not limited to explicit inputs or control interfaces; bodily presence and action themselves become part of the data flow -EDT operates not as a closed system but as an experiential apparatus that is continuously reconfigured

제조 디지털트윈에서 추구되는 정확성, 안정성, 예측 가능성을 그대로 계승하지 않는다. 대신, 불완전한 데이터와 비결정적 상호작용을 구조적으로 허용함으로써, 경험을 유도하는 시스템 설계를 방법론의 핵심 원리로 삼는다. 이러한 선택은 기술적 한계의 결과가 아니라, EDT를 경험 생성 매체로 성립시키기 위한 의도적 방법론적 결정이다. 이러한 구조적 설계 절차를 명시적으로 제시함으로써, 디지털트윈을 미디어아트 영역에서 재현 가능하게 활용할 수 있는 방법론적 토대를 제공한다.

3-3 향후 실증 연구를 위한 EDT 기반 설계 지침 및 검증 방향

EDT 프레임워크를 실제 미디어아트 제작 및 연구 현장에 적용하기 위한 방법론적 가이드라인을 제시한다. 앞서 제안한 시스템 아키텍처가 구체적인 작품 생성 공정으로 어떻게 전환될 수 있는지를 보여주는 설계 지침(Design Guidelines)이자, 대규모 공간에서의 인터랙티브 전시를 평가하기 위해 디지털 트윈을 설계 도구로 활용하는 최신 연구 흐름과도 궤를 같이하며[42], 기술적 정확성보다 사용자 경험의 정합성이 중요함을 시사한다. 본 연구는 프레임워크의 유효성을 논

리적으로 검증하기 위해 다음과 같은 가상의 구현 시나리오와 경험적 정합성 검증 체계를 제안하며, 이를 통해 EDT가 지향하는 시스템 아키텍처 기반 방법론의 실천적 근거를 마련하고자 한다.

표 4. EDT의 경험적 일관성을 위한 시나리오 기반 평가

Table 4. Scenario-based evaluation for experiential consistency in experiential digital twins

Step	Description and Characteristics	Observation Points
① Physical Trigger	Environmental changes (temperature, illumination, noise) Bodily movements of the audience Real-time changes in urban or spatial data	Time of occurrence (timestamp) Intensity and type of change
② State Interpretation	Sensor data are transformed into artistic variables Examples: temperature → color spectrum; crowd density → sound density	State change logs Consistency of interpretation rules
③ Experiential Simulation	Simulation outcomes generate sensory responses rather than mechanical predictions Visual, auditory, and spatial transformations	Response generation time Continuity or discontinuity of responses
④ Perceptual Response	Audience perceives visual, auditory, and spatial changes Bodily immersion and focused attention emerge	Dwell time Gaze movement Re-engagement behavior
⑤ Audience Interpretation	Audience recognizes that their actions influence the system Audience perceives that environmental changes are reflected in the expression	Post-experience interviews Surveys (Likert scale) Recognition of causality
⑥ Experiential Consistency Evaluation	Sustained perception of causality Response latency within an acceptable range Absence of semantic breakdown during repeated experiences	High / Moderate / Low Experiential Consistency Or Success / Partial / Failure

1) 시나리오 기반 프로토타입 설계

프레임워크의 각 계층이 유기적으로 작동하는 과정을 검증하기 위해 '도심 광장의 유동 인구 데이터를 활용한 실시간 생성적 미디어아트' 시나리오를 상정할 수 있다.

- 물리적 현실 계층(Physical Reality Layer)의 실무적 구현: 대상 공간에 설치된 LiDAR 센서 및 환경 센서를 통해 보행자의 위치, 속도, 군집 밀도 등의 비정형 데이터를 실시간으로 수집한다. 이때 공학적 디지털트윈이 추구하는 완벽한 계층 대신, 데이터의 결측이나 노이즈를 '도시의 우발적 리듬'으로 수용하는 데이터 수집 프로토콜을 설정한다.

- 데이터 해석 계층(Data Interpretation Layer)의 의미적 매핑: 수집된 보행자의 밀도 데이터는 색채의 채도로, 보행 속도는 시각적 입자의 운동 에너지(Force field)로 매핑된다. 이는 수치적 정확성을 위한 정규화가 아니라, 데이터가 내포한 동적 에너지를 예술적 서사로 변환하는 '해석적 변환(Interpretive Translation)' 과정을 거친다.
- 경험적 시뮬레이션 계층(Experiential Simulation Layer)의 생성적 구동: 물리 기반 엔진을 통해 가상의 입자 시스템(Particle System)이 구동되며, 현실의 보행 흐름과 동기화된 가상 모델이 생성된다. 시뮬레이션은 미래 예측이 아닌, 현재의 감각적 피드백을 극대화하는 방향으로 연산 최적화를 수행하며, 사용자에게 공간의 보이지 않는 에너지를 가시화하여 제공한다.
- 사용자 상호작용 계층(Audience Interaction Layer)의 피드백 루프: 사용자의 능동적 개입(접근, 정지, 체스처 등)은 다시 물리적 계층의 데이터로 환류되어 시뮬레이션의 변이를 유도한다. 이는 사용자가 시스템의 일부가 되는 개방형 루프(Open-loop) 구조를 실증한다.

2) 설계 방법론의 검증 지표: 경험적 정합성

제안된 아키텍처의 타당성을 검증하기 위해 공학적 오차율 대신 '경험적 정합성'을 평가 척도로 제시한다. 이는 시스템 아키텍처가 의도한 예술적 서사와 사용자가 인지하는 경험적 피드백 사이의 일치 정도를 의미한다.

- 상호작용적 인과성(Interactional Causality): 사용자의 행위와 시스템 반응 간의 지연 시간이 경험적 임계치를 넘지 않고, 논리적인 인과관계로 인지되는지에 대한 기술적 동기화 수준을 측정한다.
- 서사적 연속성(Narrative Continuity): 실시간 데이터의 변동성 속에서도 시스템이 생성하는 감각적 출력이 일정한 미학적 톤앤매너를 유지하며, 사용자에게 파편화되지 않은 서사적 맥락을 제공하는지 평가한다.
- 공간적 현존감(Spatial Presence): 물리 공간의 데이터가 가상 시뮬레이션을 통해 재매개(Remediation)될 때, 사용자가 가상과 물리 세계 사이에서 느끼는 공존의 깊이를 질적 인터뷰 및 체류 시간 분석을 통해 검토한다.

결과적으로, EDT 방법론은 고정된 결과물이 아닌 '경험 생성의 규칙'을 설계하는 것이며, 상기 기술된 프로토타입 공정을 통해 디지털트윈 기술이 미디어아트의 새로운 창작 프레임워크로 기능할 수 있음을 체계적으로 증명한다.

3-4 EDT 프레임워크의 기존 작품 소급 적용 분석

본 연구에서 제안한 EDT 4계층 프레임워크의 유효성을 검증하기 위해, 세계적인 미디어아트 작품인 라파엘 로자노-헤머(Rafael Lozano-Hemmer)의 <Pulse Room>과 팀랩

(teamLab)의 <Forest of Resonating Lamps>를 대상으로 프레임워크를 소급 적용하여 분석하였다. 이는 제안된 아키텍처가 실제 예술 현장의 복잡한 상호작용 구조를 체계적으로 설명할 수 있음을 입증하기 위함이다.

표 5. EDT 4계층 프레임워크 기반 기존 미디어아트 작품 분석
Table 5. Analysis of existing media art works based on the EDT 4-layer framework

EDT layer	<Pulse Room> (Lozano-Hemmer)	<Forest of Resonating Lamps> (teamLab)
Physical Reality	Real-time heart rate (BPM) data collection via audience fingerprint sensor contact	Collection of data on the location of visitors within the exhibition hall and their distance from adjacent ramps
Data Interpretation	Map individual heart rate data to the flashing cycle and intensity change values of a light bulb	Convert audience location into specific color code and diffusion rate variables
Experiential Simulation	[Maintain State] Store past audience heart rate states in a light bulb array and activate a simulation loop that sequentially shifts the entire state upon the influx of new data.	[State Transition] Simulates the light propagation path as a graph structure to calculate the diffusion and interference states of light in real time in response to audience intervention.
Audience Interaction	An emotionally immersive experience where the audience recognizes that their biosignals become part of a vast history of light.	Experiencing the value of physical presence and coexistence through the process in which the audience's presence transforms the visual order of the entire space

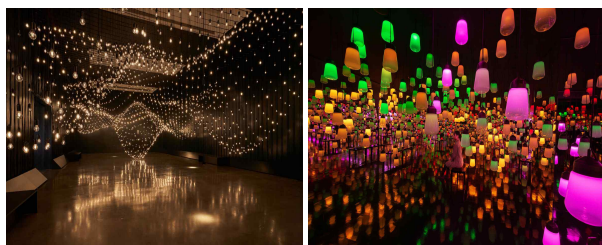


그림 5. 미디어아트 사례 <Pulse Room>(왼쪽)과 <Forest of Resonating Lamps>(오른쪽)
Fig. 5. Media art examples <Pulse Room> (left) and <Forest of Resonating Lamps> (right)

분석 결과, 두 작품 모두 단순한 센서 반응을 넘어 시스템 내부의 '상태(State)'를 지속적으로 갱신하고 시뮬레이션하는 EDT의 핵심 구조를 따르고 있음을 확인하였다. 특히 로자노-헤머의 작품은 과거의 데이터를 소멸시키지 않고 시스템의 상태로 축적한다는 점에서 디지털트윈의 시간적 연속성을 충실히 반영한다. 이러한 분석은 본 연구가 제안한 프레임워크가 향후 새로운 미디어아트 시스템을 설계할 때뿐만 아니라,

기존의 복잡한 상호작용 구조를 분석하고 평가하는 분석 툴 (Analytical Tool)로서도 높은 유효성을 가짐을 시사한다.

3-5 Operationlizing Experiential Consistency

‘경험적 정합성(Experiential Consistency)’은 Experiential Digital Twin(EDT)의 핵심 평가 기준으로 설정되었으나, 이를 선언적 개념에 머무르지 않고 조작적으로 정의할 필요가 있다. 본 연구에서 경험적 정합성이란, 사용자가 디지털트윈 시스템과 상호작용하는 과정에서 물리적 변화-가상 상태-감각적 반응 간의 인과적 연속성이 일관되게 인식되는 정도로 정의된다. 이는 공학적 의미의 정확성이나 오차 최소화와는 다른 차원의 평가 기준으로, 경험 생성 시스템으로서 EDT의 타당성을 검증하기 위한 대안적 축을 제공한다.

경험적 정합성은 본질적으로 주관적 경험을 포함하지만, 완전히 비측정적 개념은 아니다. 본 연구는 이를 측정 가능하게 하기 위해 다음과 같은 준정량적 평가 차원(semi-quantitative dimensions)으로 분해한다. 첫째, 인과성 인식 정도는 사용자가 물리적 변화(환경, 신체 움직임, 데이터 변화)가 가상 표현에 반영된다고 인식하는 수준을 의미하며, 사후 설문을 통해 Likert 척도로 측정될 수 있다. 둘째, 반응 지연 허용 범위는 물리 변화와 감각 반응 사이의 시간 지연이 경험의 연속성을 훼손하지 않는 한계를 의미하며, 시스템 로그와 사용자 주관 평가를 결합하여 분석할 수 있다. 셋째, 상태 변화의 의미적 일관성은 반복 관람 또는 장시간 체류 시에도 시스템 반응이 임의적이기보다는 해석 가능한 규칙성을 유지하는지를 평가한다.

이러한 접근은 기존 HCI 및 미디어아트 연구에서 사용되어 온 몰입도(immersion), 현존감(presence), 반응성(responsiveness) 평가 도구와 개념적으로 연결된다. 예를 들어, 현존감 설문에서 다루는 ‘환경 반응의 자연스러움’이나 ‘행위 결과의 예측 가능성’은 경험적 정합성의 하위 요소로 재해석될 수 있다. 중요한 점은, EDT의 평가가 공학적 검증을 대체하는 것이 아니라, 정확성 중심 검증과 병렬적으로 작동하는 또 하나의 검증 차원을 제안한다는 점이다. 즉, 제조 디지털트윈이 물리적 정합성을 검증 대상으로 삼는다면, EDT는 경험적 정합성을 검증 대상으로 삼으며, 두 기준은 목적과 적용 맥락에 따라 선택적으로 사용된다.

IV. 논 의

경험적 정합성은 공학적 정확성을 부정하는 개념이 아니라, 경험 생성 시스템에 적합한 검증 기준을 재정렬한 결과로 이해되어야 한다. Experiential Digital Twin(EDT)은 실시간 인터랙티브 미디어 시스템이나 데이터 기반 미디어아트와 구분되는 명확한 디지털트윈적 성격을 전제로 한다. EDT가 단순한 센서 반응형 시스템이나 사이버-물리 시스템(CPS)

기반 인터랙티브 아트로 오인될 수 있는 가능성을 고려할 때, 본 연구는 EDT를 디지털트윈으로 규정하는 최소 조건을 명시적으로 정의할 필요가 있다. 이는 EDT가 기존 디지털트윈 개념을 확장하는 연구임을 이론적으로 정합화하기 위한 전제이다.

첫째, EDT는 물리 현실과 가상 시스템 간의 지속적이고 구조적인 동기화 관계를 전제로 한다. 이는 일회적 데이터 수집이나 이벤트 기반 반응과 구별되며, 물리 환경의 상태 변화가 시간에 따라 누적되고 가상 모델의 상태를 지속적으로 갱신하는 구조를 의미한다. 이러한 동기화는 단순한 입력-출력 반응이 아니라, 물리 시스템의 현재 상태가 가상 시스템의 내부 상태를 규정하는 원인으로 작동한다는 점에서 디지털트윈의 핵심 조건을 충족한다.

둘째, EDT에서는 물리 상태 변화가 가상 상태 변화의 직접적인 원인으로 작동하며, 이 관계는 명시적인 상태(state) 개념을 기반으로 한다. 즉, EDT는 센서 값을 즉각적으로 시각화하는 시스템이 아니라, 해석 계층을 거쳐 구성된 상태 변수가 시뮬레이션의 진행과 결과를 결정하는 구조를 갖는다. 이러한 상태 기반 시뮬레이션은 제조업 디지털트윈에서의 공정 상태, 장비 상태 개념과 구조적으로 대응되며, EDT의 시뮬레이션이 단순한 반응형 애니메이션과 구분되는 이유를 설명한다.

셋째, EDT의 시뮬레이션은 결과 표현의 형태가 감각적 경험이라는 점에서 제조 디지털트윈과 다르지만, 시뮬레이션 자체는 여전히 시스템 상태의 전이를 계산하고 갱신하는 과정으로 구성된다. 즉, EDT는 예측 정확도를 목표로 하지 않더라도, 상태 간 관계를 모델링하고 이를 시간 축에서 전개하는 디지털트윈의 기본 연산 구조를 유지한다. 이러한 점에서 EDT는 ‘시뮬레이션을 활용한 미디어아트’가 아니라, ‘미디어 아트 경험 생성을 목적으로 재구성된 디지털트윈’으로 이해되어야 한다.

이와 같은 최소 조건을 충족한다는 점에서 EDT는 단순한 인터랙티브 미디어 시스템이나 CPS 기반 예술 시스템과 구별된다. 후자의 경우 센서 입력과 출력 간의 즉각적 대응 관계가 중심이 되며, 물리-가상 간 상태 동기화나 지속적인 시뮬레이션 구조를 전제하지 않는다. 반면 EDT는 물리 현실, 해석된 상태, 시뮬레이션, 그리고 사용자 개입이 하나의 상태 전이 시스템으로 통합된 구조를 갖는다는 점에서 디지털트윈의 범주 안에 위치한다.

4-1 검증기준의 전환: 정확성에서 경험적 성과로

제조업 중심 디지털트윈에서 검증(validation)은 주로 정량적 정확성 지표에 의해 수행된다. 물리 시스템과 가상 모델 간의 일치 정도, 예측 오차율, 시뮬레이션 결과의 성공률은 디지털트윈의 신뢰성을 판단하는 핵심 기준으로 작동해 왔다. 이러한 검증 방식은 디지털트윈이 제어와 의사결정을 지원하는 도구라는 전제를 공유하며, 시스템이 얼마나 현실을 정확

히 반영하고 미래 상태를 예측할 수 있는지를 중심으로 평가된다. 그러나 Experiential Digital Twin(EDT)에서는 이러한 검증 논리가 그대로 적용되기 어렵다. EDT의 목적은 현실 상태를 정확히 복제하거나 예측하는 데 있지 않으며, 오히려 현실 데이터가 사용자에게 어떠한 경험을 생성하는지를 중심으로 설계되기 때문이다.

이에 따라 EDT의 검증 기준을 데이터-표현의 동기화 체감도, 가상-물리 공간의 현존감 일치율과 같은 경험 중심 지표로 전환할 것을 제안한다. 이러한 지표는 디지털트윈이 생성하는 경험이 사용자의 주의를 지속적으로 유지하고, 공간에 머무르게 하며, 다시 경험하고자 하는 동기를 형성하는지를 간접적으로 드러낸다. 중요한 점은 이들 지표가 단일 최적값을 갖지 않는다는 것이다. 몰입도나 체류 시간은 상황과 사용자에 따라 변동 가능하며, 이러한 변동성 자체가 EDT가 지향하는 비결정적 경험 구조와 부합한다. 따라서 EDT의 검증은 ‘정확한 예측에 도달했는가’가 아니라, ‘경험이 의미적으로 일관된 방식으로 생성되고 유지되는가’라는 질문으로 재구성된다. 이와 같은 검증 기준의 전환은 디지털트윈 연구가 성능 중심 평가에 국한되지 않고, 경험과 해석의 영역으로 확장될 수 있음을 시사한다.

4-2 혼합 방법론 관점에서 본 제조 디지털트윈과 EDT의 차이

제조 디지털트윈과 EDT의 차이는 정량-정성 데이터를 결합하는 방식에서도 명확히 드러난다. 제조업 디지털트윈에서 사용자 행동 로그는 주로 시스템 효율이나 작업 성과를 평가하기 위한 보조 지표로 활용된다. 반면 EDT에서 사용자 행동 로그는 경험의 흐름을 분석하는 핵심 자료로 기능한다. 예를 들어, 사용자의 이동 경로, 체류 지점, 상호작용 빈도는 시스템의 오류를 진단하기 위한 데이터가 아니라, 경험이 어떻게 공간적으로 전개되고 어떤 요소가 사용자의 주의를 끄는지를 해석하기 위한 단서로 활용된다. 이러한 로그 데이터는 수치적으로 분석될 수 있으나, 그 해석은 경험적 맥락과 분리될 수 없다는 점에서 정량과 정성의 경계를 넘나든다.

정성적 방법 역시 제조 디지털트윈과 EDT에서 상이한 역할을 수행한다. 제조업 환경에서 인터뷰나 관찰은 시스템 사용성 개선이나 작업 효율 분석을 위한 보조적 수단으로 제한되는 경우가 많다. 반면 EDT에서는 사용자 인터뷰와 현장 관찰이 경험의 의미 구조를 이해하는 주요 방법론으로 작동한다. 사용자가 작품을 어떻게 해석하는지, 시스템의 반응을 의도된 서사로 인식하는지, 혹은 우발적 현상으로 경험하는지는 수치화된 지표만으로는 포착되기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 사용자의 언어적 서술, 신체 반응, 체류 태도를 경험의 일관성을 검토하는 질적 근거로 활용한다.

이러한 혼합 방법론적 접근에서 중요한 것은 EDT의 방법론적 입장이 정확성 검증에 있지 않다는 점이다. 사용자 행동 로그, 인터뷰, 관찰은 하나의 ‘정답 경험’을 입증하기 위한 도구가 아니라, 시스템이 생성하는 경험이 내부적으로 일관된

의미 체계를 유지하고 있는지를 검토하기 위한 자료로 활용된다. 즉, EDT의 검증은 데이터와 해석 사이의 불일치를 제거하는 것이 아니라, 다양한 반응 속에서도 경험의 방향성과 감각적 논리가 유지되는지를 확인하는 과정이다. 이러한 논의는 디지털트윈 연구가 정량적 정확성 중심의 평가 패러다임을 넘어, 의미와 경험의 일관성을 중심으로 한 새로운 검증 프레임워크를 수용할 수 있음을 제시한다.

본 연구에서 제안하는 Experiential Digital Twin(EDT)은 디지털트윈의 검증과 평가에 대한 기존의 공학적 전제를 근본적으로 재구성한다. 제조업 디지털트윈이 정확도, 오차율, 예측 성공률과 같은 정량적 지표를 통해 현실 재현의 신뢰성을 입증해 왔다면, EDT는 몰입도, 체류 시간, 반복 관람 유도와 같은 경험 중심 지표를 통해 의미 생성의 지속성과 일관성을 검토한다. 이와 동시에 사용자 행동 로그, 인터뷰, 현장 관찰을 결합하는 혼합 방법론은 EDT가 단일한 '정답 상태'를 산출하는 시스템이 아니라, 다양한 해석과 반응 속에서도 경험적 논리를 유지하는 구조임을 드러낸다. 이러한 전환은 정확성을 최대화하는 계측 중심 패러다임에서 벗어나, 불완전성과 비결정성을 설계 자원으로 수용하는 방법론적 입장을 정당화하며, 디지털트윈을 제어와 예측의 도구를 넘어 경험과 서사를 생성하는 매개체로 확장할 수 있는 이론적 가능성을 제시한다.

V. 결 론

본 연구는 제조업 중심으로 발전해 온 디지털트윈 개념을 미디어아트 영역으로 확장하기 위해, Experiential Digital Twin(EDT)라는 목적 전환 모델을 이론적·구조적으로 제안하였다. 기존 디지털트윈이 최적화, 오류 감소, 예측 정확성을 중심으로 한 공학적 방법론에 기반해 왔다면, 본 연구는 동일한 구조적 자원을 유지한 채 해석, 감각화, 서사 생성이라는 경험 중심 목적을 수행하도록 재구성할 수 있음을 논증하였다. 이를 위해 본 연구는 개념적 전환 논리(그림 2)와 시스템 아키텍처 기반 구현 기준(그림 3)을 제시하고, Design-oriented research이자 System architecture-based methodology라는 방법론적 입장을 통해 재현 가능한 설계 절차를 도출하였다. 나아가 정확성 중심 검증에서 의미의 일관성 중심 검증으로의 전환을 논의함으로써, 디지털트윈 연구의 평가 패러다임을 확장하는 이론적 기여를 수행하였다.

첫째, 본 연구는 디지털트윈과 미디어아트를 연결하는 새로운 융합 산업 가능성을 제시한다는 점에서 의의를 가진다. EDT는 문화기술(CT), 스마트 전시, 디지털 헤리티지와 같은 영역에서 현실 데이터 기반 경험 생성 시스템으로 활용될 수 있으며, 이는 디지털트윈이 산업 효율화 도구를 넘어 문화적·사회적 가치 창출을 수행할 수 있음을 시사한다. 특히 도시 공간, 역사적 장소, 문화 유산을 대상으로 한 실시간 경험형

콘텐츠 설계에 있어 EDT는 기술과 해석을 통합하는 핵심 프레임워크로 기능할 수 있다.

둘째, 제조업 중심 디지털트윈 시장이 직면한 적용 영역의 한계를 극복할 수 있는 확장 방향을 제시한다. 기존 디지털트윈은 고비용 센서 구축, 완전한 계측, 명확한 성과 지표가 요구되는 산업 환경에 최적화되어 왔으며, 이로 인해 적용 분야가 제한되는 경향이 있었다. EDT는 결측 데이터와 노이즈를 오류가 아닌 표현 자원으로 수용함으로써, 완벽한 계측이 어려운 환경에서도 의미 있는 활용이 가능함을 보여준다. 이는 디지털트윈 기술이 보다 유연하고 개방적인 시장으로 확장될 수 있는 가능성을 제시한다.

셋째, 디자이너와 엔지니어의 역할을 재정의한다. 제조 디지털트윈에서 이들의 역할이 주로 시스템의 안정성과 정확성을 확보하는 설계자에 머물렀다면, EDT에서는 경험의 구조와 흐름을 설계하는 경험 구조 설계자로 확장된다. 이는 기술 구현 능력과 감각적·서사적 설계 역량이 분리되지 않고, 시스템 아키텍처 차원에서 통합되어야 함을 시사하며, 향후 디지털트윈 기반 콘텐츠 설계 인력의 전문성에 대한 새로운 기준을 제안한다.

본 연구가 제안한 EDT 프레임워크는 단순한 기술적 시연을 넘어, 디지털트윈 아키텍처를 미디어아트 설계의 표준적 방법론으로 전환했다는 점에서 중요한 학술적 가능성을 지닌다. 기존의 인터랙티브 미디어 연구가 개별 작품의 구현 기법에 집중했다면, 본 프레임워크는 '몰리-데이터-시뮬레이션-상호작용'으로 이어지는 4계층 구조를 통해 재현 가능한 시스템 설계 절차를 제공한다. 이는 향후 미디어아트 작가와 엔지니어가 실시간 데이터 기반의 복잡한 시스템을 구축할 때, 경험의 일관성을 유지하며 기술적 요소를 배치할 수 있는 구조적 가이드라인으로 기능할 수 있다. 특히, 공학적 최적화에 매몰되어 있던 디지털트윈의 '상태 기반 시뮬레이션' 개념을 예술적 서사 생성의 핵심 기제로 재정의함으로써, 기술의 도구적 활용을 넘어 매체 미학적 확장을 이끌어낼 수 있는 이론적 토대를 마련하였다.

향후 연구에서는 실제 전시 프로젝트를 통해 사용자 반응 데이터를 체계적으로 수집하고, 이를 기반으로 EDT의 경험 생성 구조를 정교화할 필요가 있다. 특히 사용자 행동 로그와 정성적 반응을 결합한 데이터 분석을 통해 경험적 일관성의 평가 기준을 구체화하는 연구가 요구된다. 나아가 AI 기반 감성 인식 및 반응 모델을 EDT 구조에 통합함으로써, 사용자의 정서 상태에 따라 동적으로 변화하는 감성 반응형 디지털트윈으로 확장하는 후속 연구 또한 유의미한 발전 방향이 될 것이다. 이러한 확장은 EDT를 단순한 경험 생성 시스템을 넘어, 인간과 환경 간의 감각적 상호작용을 매개하는 차세대 디지털트윈 모델로 발전시키는 토대를 제공할 것으로 기대된다.

이러한 연구는 디지털트윈 기술을 기계적 활용만이 아닌 사용자 경험 측면에서 접근함으로써 문화기술(CT)적 사용가능성을 기대할 수 있도록 해준다는 점에서 융합연구관점에서의 프레임워크 제안으로서의 의미가 있다.

참고문헌

- [1] P. Wang and M. Luo, "A Digital Twin-Based Big Data Virtual and Real Fusion Learning Reference Framework Supported by Industrial Internet Towards Smart Manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 58, pp. 16-32, January 2021.
- [2] A. Bécue, E. Maia, L. Feeken, P. Borchers, and I. Praça, "A New Concept of Digital Twin Supporting Optimization and Resilience of Factories of the Future," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 13, 4482, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10134482>
- [3] G. Shao, S. Jain, C. Laroque, L. H. Lee, P. Lendermann, and O. Rose, "Digital Twin for Smart Manufacturing: The Simulation Aspect," in *Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, National Harbor: MD, pp. 2085-2098, December 2019. <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004659>
- [4] K. Ding, F. T. S. Chan, Z. Xudong, G. Zhou, and F. Zhang, "Defining a Digital Twin-Based Cyber-Physical Production System for Autonomous Manufacturing in Smart Shop Floors," *International Journal of Production Research*, Vol. 57, No. 20, pp. 6315-6334, 2019. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1566661>
- [5] F. Lu and B. Liu, "Affective Digital Twins for Digital Human: Bridging the Gap in Human-Machine Affective Interaction," arXiv:2308.10207, 2023.
- [6] L. C. Walters, R. A. Michlowitz, E. S. Martinez, R. P. McMahan, and J. T. Kider, "MemoryScan Environments: Creating Large-Scale Memory-Evocative Digital Twins," in *Proceedings of the 2023 IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, Orlando: FL, pp. 1-6, November 2023. <https://doi.org/10.1109/DTPI59677.2023.10365482>
- [7] J. Dewey, *Art as Experience*, New York, NY: Minton, Balch & Company, 1934.
- [8] D. Y. Jeong, "Technical Definition and Detailed Development of Digital Twins: A 5-Stage Model," *OSIA Standards & Technology Review Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 10-16, 2021.
- [9] G. Lee, K. Lee, S. Chang, S. Park, S. Lee, O. Yu, and J. Yoon, "Development of Digital Twin in an Assembly Production System: Case Study," *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 42-49, 2024. <http://dx.doi.org/10.7315/CDE.2024.042>
- [10] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 4, pp. 2405-2415, April 2019. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- [11] M. Grieves and J. Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Cham: Springer, pp. 85-113, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- [12] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 11, pp. 1016-1022, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- [13] J. Wang, Y. Ma, L. Zhang, R. X. Gao, and D. Wu, "Deep Learning for Smart Manufacturing: Methods and Applications," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 48, pp. 144-156, July 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>
- [14] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, "Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, pp. 3563-3576, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- [15] S. Boschert and R. Rosen, Digital Twin—The Simulation Aspect, in *Mechatronic Futures*, Cham: Springer, pp. 59-74, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- [16] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 21980-22012, January 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- [17] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 108952-108971, May 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- [18] B. Tan and A. Matta, "The Digital Twin Synchronization Problem: Framework, Formulations, and Analysis," *IIEE Transactions*, Vol. 56, No. 6, pp. 652-665, 2024. <https://doi.org/10.1080/24725854.2023.2253869>
- [19] J. Leng, H. Zhang, D. Yan, Q. Liu, X. Chen, and D. Zhang, "Digital Twin-Driven Manufacturing Cyber-Physical System for Parallel Controlling of Smart Workshop," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 10, pp. 1155-1166, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0881-5>
- [20] Y. Fang, C. Peng, P. Lou, Z. Zhou, J. Hu, and J. Yan, "Digital-Twin-Based Job Shop Scheduling Toward Smart Manufacturing," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 12, pp. 6425-6435, December 2019. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2938572>
- [21] T. H.-J. Uhlemann, C. Schock, C. Lehmann, S. Freiburger,

- and R. Steinhilper, "The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems," *Procedia Manufacturing*, Vol. 9, pp. 113-120, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
- [22] Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, and X. Xu, "Digital Twin-Driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 61, 101837, February 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- [23] K. Kim, "Analysis of the Characteristics of Media Art: A Case Study Based on Materiality of the Medium," *Journal of Next-Generation Convergence Information Services Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 65-74, 2025, <http://dx.doi.org/10.29056/jncist.2025.11.06>
- [24] Z. Liu and S. Chang, "A Study of Digital Exhibition Visual Design Led by Digital Twin and VR Technology," *Measurement: Sensors*, Vol. 31, 100970, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100970>
- [25] C. Paul, *Digital Art*, 4th ed., London: Thames & Hudson, 2023.
- [26] C. Paul, *Digital Art*, 3rd ed., London: Thames & Hudson, 2015.
- [27] E. Edmonds, "The Art of Interaction," *Digital Creativity*, Vol. 21, No. 4, pp. 257-264, December 2010. <https://doi.org/10.1080/14626268.2010.556347>
- [28] R. W. Kluszczyński, "Strategies of Interactive Art," *Journal of Aesthetics & Culture*, Vol. 2, No. 1, 5525, 2010. <https://doi.org/10.3402/jac.v2i0.5525>
- [29] R. J. Teather, A. Pavlovych, W. Stuerzlinger, and I. S. MacKenzie, "Effects of Tracking Technology, Latency, and Spatial Jitter on Object Movement," in *Proceedings of the 2009 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Lafayette: LA, pp. 43-50, March 2009. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2009.4811204>
- [30] C. Sommerer and L. Mignonneau, *Christa Sommerer & Laurent Mignonneau: Interactive Art Research*, Vienna: Springer Wien New York, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-99016-2>
- [31] B. G. Witmer and M. J. Singer, "Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 7, No. 3, pp. 225-240, June 1998. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- [32] M. V. Sanchez-Vives and M. Slater, "From Presence to Consciousness Through Virtual Reality," *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 6, pp. 332-339, April 2005. <https://doi.org/10.1038/nrn1651>
- [33] M. Merleau-Ponty, *Phénoménologie de la perception*, Paris: Gallimard, 1945.
- [34] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, "Review of Digital Twin About Concepts, Technologies, and Industrial Applications," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 58, pp. 346-361, January 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- [35] E. VanDerHorn and S. Mahadevan, "Digital Twin: Generalization, Characterization and Implementation," *Decision Support Systems*, Vol. 145, 113524, June 2021. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- [36] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems," *Manufacturing Letters*, Vol. 3, pp. 18-23, January 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- [37] F. B. Viégas and M. Wattenberg, "Artistic Data Visualization: Beyond Visual Analytics," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Online Communities and Social Computing (HCII 2007)*, Beijing, China, pp. 182-191, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73257-0_21
- [38] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, and S. Wartzack, "Shaping the Digital Twin for Design and Production Engineering," *CIRP Annals*, Vol. 66, No. 1, pp. 141-144, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- [39] W. W. Gaver, J. Beaver, and S. Benford, "Ambiguity as a Resource for Design," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '03)*, Ft. Lauderdale: FL, pp. 233-240, April 2003. <https://doi.org/10.1145/642611.642653>
- [40] A. B. Yu and J. Min, "Embodied Ink: A Multisensory Reinterpretation of Chinese Calligraphy Through Digital Twins and Immersive Realities," in *Proceedings of the 33rd ACM International Conference on Multimedia*, Dublin: Ireland, pp. 13606-13607, 2025 October. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3746027.3756139>
- [41] C. Cimino, E. Negri, and L. Fumagalli, "Review of Digital Twin Applications in Manufacturing," *Computers in Industry*, Vol. 113, 103130, December 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
- [42] J. Wieland, D. I. Fink, A. V. Reinschluessel, J. Häßler, T. Feuchtnner, and H. Reiterer, "Using Digital Twins to Design and Evaluate Interactive Exhibitions: A Case Study with Handheld AR," in *Proceedings of the 2026 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Barcelona: Spain, pp. 1-26, April 2026. <https://dl.acm.org/doi/full/10.1145/3772318.3790852>



진형우 (Hyung-Woo Jin)

2012년 : 동서대학교

디지털프로덕션전공

2016년 : 동서대학교 일반대학원

(공학석사)

2016년~2020년: 스밋스튜디오 대표

2018년~2020년: 주식회사 유캔스타 팀장

2020년~2022년: 부산경상대학교 컴퓨터정보융합과 조교수

2022년~2025년: 동서대학교 산학협력단 연구교수

2016년~현 재: 동서대학교 일반대학원 영상콘텐츠학과
(박사과정)

※ 관심분야 : 사용자경험 디자인, 디지털콘텐츠, 가상현실, 미디어아트, 디지털트윈



최규혁 (GyuHyeok Choi)

2015년 : 동서대학교 일반대학원

(공학석사)

2019년 : 동서대학교 일반대학원

(공학박사-영상콘텐츠)

2019년~2021년: 동서대학교 산학협력단 전임연구원

2021년~2024년: 동서대학교 아시아미래디자인연구소
전임연구원

2024년~2025년: 동서대학교 아시아미래디자인연구소 연구교수

2025년~현 재: 부산대학교 전임연구원

※ 관심분야 : 게임시스템설계, 게임사용자 연구, 사용자경험 디자인, 게임 레벨디자인, 게이미피케이션, 콘텐츠기획, 미디어아트, 디지털트윈